

全力疾走中の疾走スピードと下肢動作の関係

渡辺 健 二 (愛知教育大学大学院)
小木曾 一 之 (鳥羽商船高等専門学校)
合 屋 十四秋 (愛知教育大学)

Relationships between Sprinting Speed and Lower Limb Motions during Sprint Running

Kenji WATANABE (Graduate Student of education)
Kazuyuki OGISO (Toba National College of Maritime Technology)
Toshiaki GOYA (Department of Health and Physical Education)

Ⅰ. 緒 言

陸上競技の短距離走に携わる競技者・コーチにとって「いかにすれば効率よく速く走る(タイムを短縮する)ことができるか。」という課題は現在に至るまで常に議論され、試行錯誤されてきた中心的課題の一つである。猪飼ら⁶⁾は、「運動の performance は、体力的要素のみならず、意欲と技術が相互依存しあうことで発生するため、より大きな疾走スピードは、より高い筋出力のみならず、合理的な疾走動作を獲得することが必要となる。」と述べている。この疾走におけるパフォーマンスを向上させるための合理的な動作に関する研究は現在までに多く報告されており^{7,8,9,10,12,13,14)}いくつかの重要な疾走動作が明らかにされている。しかし、これらの知見の大半は、パフォーマンスレベルの異なる被験者における最大スピード発揮時の疾走動作のみに着目したものや、強制的あるいは意識的に設定された疾走スピード時の疾走動作を比較することから得られたものである。全力疾走は、その疾走スピードの変化から、一般的に加速局面、最大スピード局面、速度維持局面に大別される。当然、疾走スピードを産み出す身体動作も、そのスピードの変化に伴い変化すると考えられるが、疾走スピードの経時的な変化を生み出す動作の変化を、経時的あるいはそれぞれの局面ごとに捉えたものは少なく、現在までに報告されている重要な疾走動作と同様な傾向を示すのかど

うかは明確でない。

そこで本研究では、経時的に変化する全力疾走中の疾走スピードとそれに伴って変化する下肢動作との関係を、キネマティックな分析を行うことで明らかにすることを目的とした。

Ⅱ. 方 法

1. 被 験 者

被験者は、短距離走を専門とする男子大学生10名(年齢 20.7 ± 1.2 歳、身長 1.72 ± 0.05 m、体重 63.3 ± 4.7 kg)であった。

2. 実験試技

被験者には、クラウチングスタートからの全力疾走を3本行わせた。ビデオ撮影を行う区間との関係から、試技1本目は、スタート後約10秒間、2本目は約15秒間、3本目は約20秒間にわたる疾走となった。被験者には、最初から疾走する時間および距離等を意識せずに全力疾走するように指示した。被験者は日常のトレーニングの中でスタートから全力を発揮する時間走などを取り入れており、試技に対する戸惑いはなかった。

3. ビデオ撮影

疾走動作は、試技1本目ではスタート後5~15m、20~30m、40~50m、試技2本目ではスタート後50~60m、70~80m、試技3本目ではスタート後120~130m、140~150mといった計7区間において、その左側方50m地点から高速度ビデオカメラ(Nac社製MEMRECAM C₂SおよびHSV400)

を用いて、露出時間1/2000秒でパンニング撮影した(200fps.)。撮影区間の前後左右の4地点には、実長換算を行うための較正点を1m間隔で設置した。

4. 画像分析

撮影したVTR画像をコンピューター画面と合成し、ビデオ撮影時にあらかじめ貼り付けておいた身体各部の23点のリファレンスマークおよび4つの較正点の座標を読みとることで、身体各部の実長換算を行った。デジタイズを行った23点は、左右の手掌部、手関節中心、肘関節中心、肩峰点、つま先、母子球、踵、足関節中心、膝関節中心、大転子および頭頂点、耳珠点、胸骨上縁であった。また、その範囲は、各区間におけるランニング1サイクル(左足接地から次の左足接地まで)とその前後10フレームであった。実長換算した実座標データは3点移動平均デジタルフィルター¹⁵⁾により9Hzで平滑化を行った後、14個からなる身体リンクセグメントモデル(左右の手、上腕、前腕、大腿、下腿、足および頭部、胴体)に入力し、力学的諸量を算出した。なお、これらの計算に必要な身体部分係数は、阿江らのもの¹⁾を用いた。

5. 分析項目

本研究で分析対象区間としたのは、Section1: 最大スピードの90%以下のスピードを持つ加速区間、Section2: 最大スピードの95%のスピードを持つ加速区間、Section3: 最大スピード区間、Section4: 最大スピードの95%のスピードを持つ速度維持区間、Section5: 最大スピードの90%以下のスピードを持つ速度維持区間の5区間であった。

本研究で分析した項目は、以下の通りである。下肢動作に関する項目およびその定義は伊藤らのもの⁷⁾を用いた。

- (1) 各区間における平均疾走スピード: 各区間のランニング1サイクルにおける重心の平均水平移動速度。
- (2) それぞれの区間における平均歩幅の身長比: 各区間のランニング1サイクルにおける重心の水平移動距離を身長で除した値。
- (3) 各区間における平均歩数: 各区間のランニング1サイクルにおける平均疾走スピードか

ら平均歩幅を除した値。

(4) 回復期の動作(図1)

- (a) 引き付け角度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角度の最小値。
- (b) 腿上げ角度: 胸骨上縁と大転子を結んだ線分と大転子と膝関節中心を結んだ線分のなす角度の最小値。
- (c) 振り出し角度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角度の回復期後半における最大値。
- (d) 引き付け速度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角度の屈曲速度の最大値。
- (e) 振り出し速度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角の伸展速度の最大値。
- (f) 腿上げ速度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と鉛直線のなす角速度の最大値。
- (g) 振り戻し速度: 大転子と母子球を結んだ線分と、鉛直線のなす角の接地直前の角速度の最大値。

(5) 支持期の動作(図2)

- (h) 接地時の股関節角度: 胸骨上縁と大転子を結んだ線分と大転子と膝関節中心を結んだ線分のなす角の接地時の角度。
- (i) 離地時の股関節角度: 胸骨上縁と大転子を結んだ線分と大転子と膝関節中心を結んだ線分のなす角の離地時の角度。
- (j) 接地時の膝関節角度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角の接地時の角度。
- (k) 離地時の膝関節角度: 大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角の離地時の角度。
- (l) 接地時の足関節角度: 膝関節中心と足関節中心を結んだ線分と足関節中心と母子球を結んだ線分のなす角の接地時の角度。
- (m) 離地時の足関節角度: 膝関節中心と足関節中心を結んだ線分と足関節中心と母子球を結んだ線分のなす角の離地時の角度。

- (n) 脚伸展速度：大転子と母子球を結んだ線分と、鉛直線のなす角の後方へのキック速度の最大値。
- (o) 股関節伸展速度：胸骨上縁と大転子を結んだ線分と大転子と膝関節中心を結んだ線分のなす角の伸展速度の最大値。
- (p) 膝関節伸展速度：大転子と膝関節中心を結んだ線分と、膝関節中心と足関節中心を結んだ線分のなす角の伸展速度の最大値。
- (q) 足関節足底屈速度：膝関節中心と足関節中心を結んだ線分と足関節中心と母子球を結んだ線分のなす角の伸展速度の最大値。

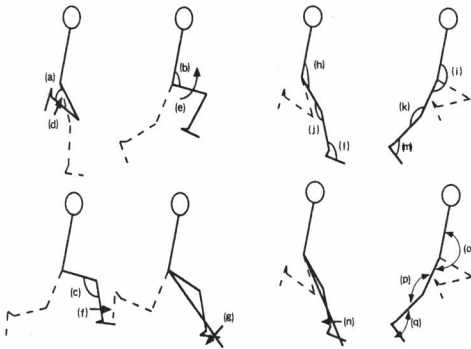


図1 身体各関節角度および角速度の定義 (回復期) 図2 身体各関節角度および角速度の定義 (支持期)

6. 統計処理

各Sectionにおける算出項目の差を検定するため一元配置分散分析を行い、F値が有意であった場合、Fisherの方法による多重比較を行った。(危険率： $p < 0.05$)。また、算出項目の関係を見るために、各項目間で回帰分析を行った。

Ⅲ. 結果

1. 分析対象とした区間の疾走スピード、平均歩幅、平均歩数

分析対象とした区間の疾走スピード、平均歩幅および平均歩数は表1に示した。最大スピード区間であるSection3に対する各Sectionにおける疾走スピードの割合は、相対値でSection1で $77.41 \pm 3.13\%$ 、Section2で $95.88 \pm 1.54\%$ 、Section4で $94.08 \pm 1.39\%$ 、Section5で $90.75 \pm 2.23\%$ であった。これは、設定した実験条件を満たすものと考えられた。

表1 疾走スピード、平均歩幅(身長比)、平均歩数

Section	疾走スピード(m/sec)	平均歩幅/身長	平均歩数(Hz)
1	7.18 ± 0.52	0.94 ± 0.05	4.42 ± 0.28
2	8.89 ± 0.46	1.14 ± 0.05	4.52 ± 0.26
3	9.27 ± 0.56	1.19 ± 0.07	4.52 ± 0.26
4	8.72 ± 0.48	1.22 ± 0.05	4.16 ± 0.26
5	8.41 ± 0.55	1.19 ± 0.05	4.11 ± 0.23

注) 値は平均値とその標準偏差を示す。

2. 疾走スピードと下肢動作の関係

(1) 回復期について

図3に振りだし角度および速度の変化を示した。振り出し角度は、Section1からSection2にかけて有意に増加し ($p < 0.001$)、その後も時間の変化に伴い増加する傾向にあった。振り出し速度は、Section1からSection2にかけて有意に増加し ($p < 0.001$)、その後Section3まで維持された後、減少する傾向にあった(図4)。また、振り出し速度は疾走速度との間に $y = 0.77x + 24.24$ ($r = 0.72$, $p < 0.001$) という相関関係が認められた(図4)。振り出し速度は、振り出し角度、振り出し速度と同様に、Section1からSection2にかけては有意に増加し ($p < 0.05$)、その後は停滞する傾向にあった(図5)。引き付け角度、速度および腿上げ角度、速度においては、疾走スピードとの間に明らかな関係は見られなかった。

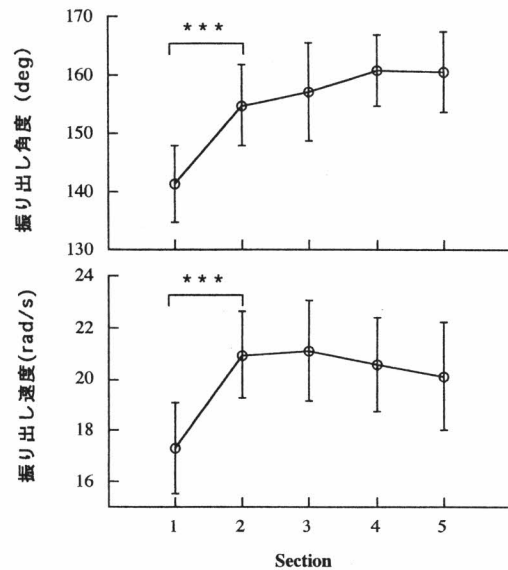


図3 振り出し角度および速度の変化

値は平均値およびその標準偏差

* $p < 0.05$ ** $p < 0.01$ *** $p < 0.001$

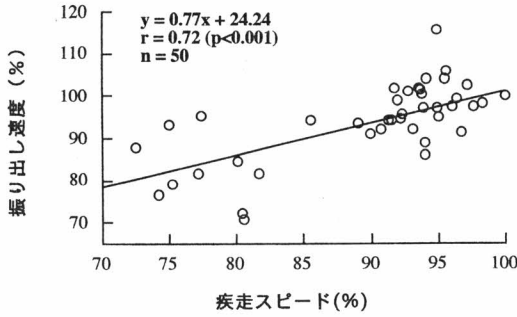


図4 疾走スピードと振り出し速度との関係
各値はSection3の値を100としたときの相対値

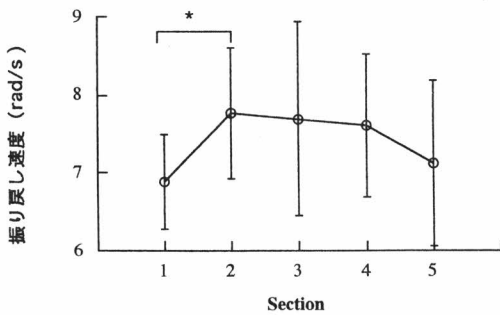


図5 振り戻し速度の変化
値は平均値およびその標準偏差
* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001

(2) 支持期について

脚伸展速度は、Section1からSection2まで有意に増加した後 (p < 0.001)、Section3まで増加し、その後は減少する傾向にあった (図6)。この脚伸展速度は疾走スピードとの間には唯一、 $y = 1.03x - 0.75$ ($r = 0.90$, $p < 0.001$) という高い相関関係が認められ (図7)、その他の股関節、膝関節および足関節伸展速度と疾走スピードとの間には有意な相関関係は認められなかった。

図8は、支持期中における下肢の各関節の動作範囲 (接地時と離地時の下肢関節角度の差) の変化を示している。股関節の動作範囲は、Section1からSection2にかけてやや減少する傾向を示した後、平均で約55度から60度の範囲で変化しなかった。膝関節においては、Section1からSection2にかけてその範囲が有意に減少し (p < 0.001)、その後Section3まで減少した後、Section4において再び増加する傾向にあった。この膝関節の動作範囲と疾走スピードとの間には $y = 0.28x + 73.78$ ($r = 0.57$, $p < 0.001$) という高い負の相関関係

が認められた (図9)。足関節の動作範囲は、疾走スピードが変化しても、20度前後ではほとんど変化しなかった。

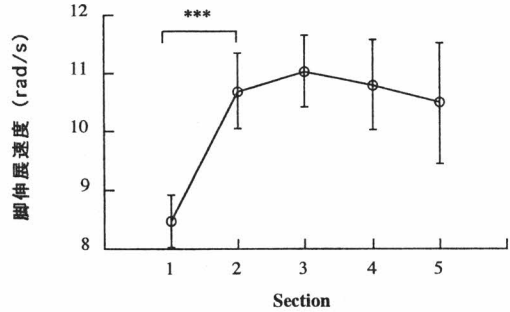


図6 脚伸展速度の変化
値は平均値およびその標準偏差
* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001

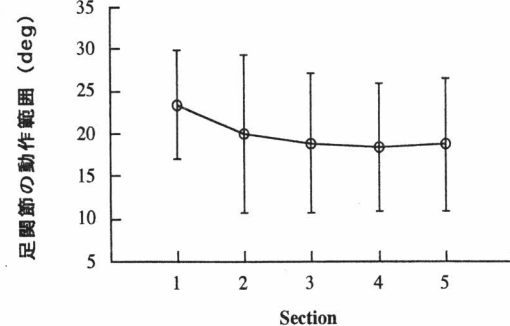
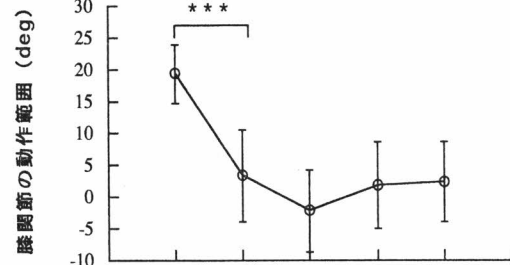
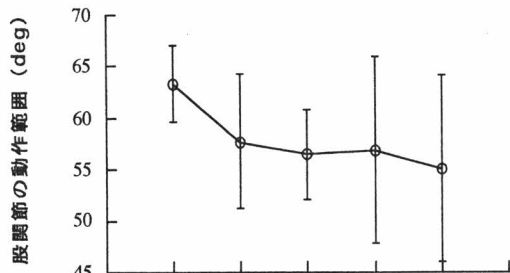


図8 支持期における下肢関節の動作範囲の変化
値は平均値およびその標準偏差
* p < 0.05 ** p < 0.01 *** p < 0.001

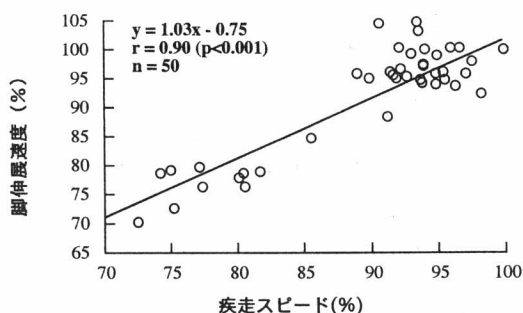


図7 疾走スピードと脚伸展速度との関係
各値はSection3の値を100としたときの相対値

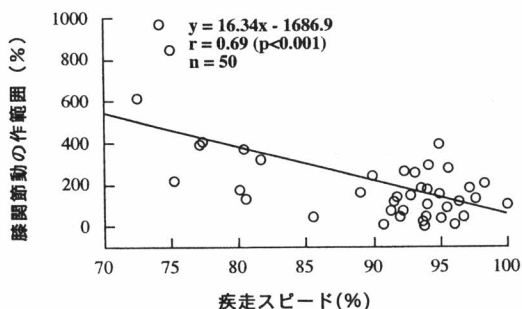


図9 疾走スピードと膝関節の動作範囲との関係
各値はSection3の値を100としたときの相対値

IV. 考 察

1. 回復期における下肢動作

回復期において下腿が振り出される角度は、その振り出される速度の最大値がSection3以降低下する傾向を示したにも関わらず、スタート後時間の経過に伴い一貫して大きくなる傾向を示した。この回復期後半における下腿の前方への振り出しは、主に関節反力によって生み出されることが報告されている¹¹⁾。また、阿江ら²⁾やChapmanら⁴⁾は、ランニングスピードの増加は、膝関節の接地直前のエキセントリックなパワーの低下により制限されると報告している。これらのことは、疾走スピードの大きさに比例して、下腿の振り出し速度も変化するものの、膝関節によるエキセントリックなパワーが低下することで、疾走後半、下腿の振り出し速度の低下にも関わらず、下腿が前方へと振り出されてしまうことを示している。この下腿の振り出し速度が増加することは、脚の慣性モーメントが増加し、そのため疾走スピードに大きな影響を及ぼす^{7,10)}脚の振り出しを遅らすものと考

えられる。また、脚の振り出し速度は、Section3まで疾走スピードが増加するにも関わらず、最大スピードの95%を有するSection2以降降停したことは、Section2における動作が、既に疾走スピードの増加を制限するものとなっていたと考えることができる。また、接地瞬時の大転子に対する足の速度（相対速度：大転子と足関節中心における水平速度の差）と疾走スピードとの関係を見ると、 $y = 2.93 + 0.96x$ ($r = 0.76, p < 0.001$) という高い相関関係が認められた（図10）。このことは、疾走スピードに大きく影響する脚の振り出しが遅れても、スタート時から大きなエネルギーが蓄えられていく³⁾胴体の勢いによってその補償がなされ、Section3まで疾走スピードが向上すると考えられる。また、このことは、接地時にその地面に対する速度がゼロとなる⁵⁾足の上に素早く腰を乗り込ませていくことが重要であることを示している。

本研究で検討した他の項目である引き付け動作と腿上げ動作に関しては、疾走中における疾走スピードの変化と明らかな関係が見られなかった。斉藤ら¹²⁾は、引き付け角度や腿上げ角度が6歳以後の疾走速度にほとんど影響しないと述べている。本研究の結果もこの報告を裏付けるものである。

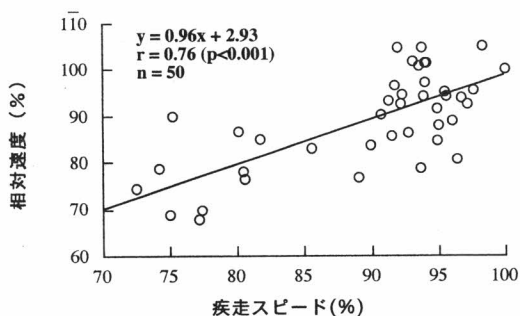


図10 疾走スピードと接地瞬時にける大転子と足の相対速度との関係
各値はSection3の値を100としたときの相対値

2. 支持期について

伊藤ら⁷⁾は、世界のトップスプリンターと日本のトップスプリンターの最大スピード時の疾走動作を比較する中で、彼らの疾走スピードの差は脚の伸展速度に起因すると報告している。尾懸ら¹⁰⁾も同様に、大学生競技者の最大スピード時の疾走

動作に着目し、脚の伸展速度の重要性を示している。最大スピード時のみでなく全力疾走中の疾走スピードの変化に伴う下肢動作の変化を分析した本研究においても、脚伸展速度は疾走スピードとの間に高い相関関係が認められ、脚伸展速度が疾走スピードの変化に大きな影響を及ぼしていることを示している。このことから、脚伸展速度は、個人間における疾走スピードの差の一因のみでなく、疾走中の時間に伴う疾走スピードの変化に対しても大きな影響を持つといえる。

一方膝関節に関しては、その動作範囲が疾走スピードと負の相関関係にあった。Waser¹⁴⁾は、「全力疾走時の支持期における膝関節の伸展の大きさや速度は、必ずしも大きな疾走スピードを生み出すものではない。」と報告している。本研究におけるこのような結果は、彼の報告を支持し、膝関節の大きな伸展は疾走スピードに悪影響を及ぼすと考えられる。股関節、膝関節および足関節の伸展速度に関しては、疾走スピードとの間に有意な関係が見られなかった。したがって、これらの項目が疾走スピードの変化に大きな影響を及ぼすものではないものと考えられた。

V. まとめ

本研究では、経時的に変化する全力疾走中の疾走スピードとそれに伴い変化する下肢動作との関係を検討した。被験者として短距離走を専門とする男子大学生10名が参加し、彼らは時間や距離を意識しない全力疾走を3本行った。彼らの疾走中における下肢動作の分析は次の5の区間を対象とした。(1)最大スピードの90%以下のスピードを持つ加速区間、(2)最大スピードの95%のスピードを持つ加速区間、(3)最大スピード区間、(4)最大スピードの95%のスピードを持つ速度維持区間、(5)最大スピードの90%以下のスピードを持つ速度維持区間の最大スピードの90%以下のスピードを持つ加速区間。

以下に示す結果が得られた。

1. 回復期における下腿の振り出し速度は疾走スピードと有意な相関関係が認められた。
2. 回復期における下腿の振り出し角度は、疾走スピードの変化に関わらず時間に伴い増加

した。

3. 振り出し速度は、疾走スピードとの間に有意な相関関係は認められなかったが、接地瞬時の大転子に対する足の速度と疾走スピードとの間には、高い相関関係が認められた。
4. 脚伸展速度は、疾走スピードとの間に高い相関関係が認められた。
5. 膝関節の動作範囲と疾走スピードの間に高い負の相関関係が認められた。

以上のことから、接地瞬時における足の上への素早い乗り込みと、続く支持期における脚の素早い伸展が疾走スピードの変化に大きな影響を及ぼすと考えられた。

VI. 引用参考文献

- (1) 阿江 通良, 湯 海鵬, 横井 孝志: 日本人アスリートの身体部分慣性特性の推定, バイオメカニズム11: 23-33, 1992.
- (2) 阿江 通良, 宮下 憲, 横井 孝志, 大木 昭一郎, 渋谷 侃二: 機械的パワーからみた疾走における下肢筋群の機能および貢献度, 筑波大学体育科学系紀要9: 229-239, 1986.
- (3) 阿江 通良, 飯干 明: 疾走中における機械的エネルギーの流れ, バイオメカニズム9: 105-113, 1988.
- (4) Chapman A. E. and G. E. Caldwell: Kinetic limitations of maximal sprinting speed, J. of Biomechanics, 16: 69-77, 1983.
- (5) Fenn W. O.: Work against gravity and work due to velocity changes in running, Am. J. Physiol. 93: 433-462, 1930
- (6) 猪飼 道夫, 芝山秀太郎, 石井 喜八: 疾走能力の分析, 体育学研究7-3: 59-70, 1963.
- (7) 伊藤 章, 斉藤 昌久, 佐川 和則, 加藤 謙一, 森田 正利, 小木曾一之: 世界一流スプリンターの技術分析, 世界一流競技者の技術, 第3回世界陸上選手権大会バイオメカニクス研究班報告書, ベースボールマガジン社: 31-49, 1994.
- (8) 宮下 憲, 阿江 通良, 横井 孝志, 橋原

- 孝博, 大木昭一郎: 世界一流スプリンターの疾走フォームの分析, *J. J. SportsSci*, 5-12: 892-899, 1986.
- (9) 村瀬 豊, 亀井 貞次, 星川 保, 宮下 充正, 松井 秀次: 陸上競技選手と非鍛錬者とに見られる走行中の足の速さについて, *体育学研究*16-5: 273-279, 1971.
- (10) 尾懸 貢, 中野 正英: 疾走能力に影響を及ぼす要因, *奈良教育大学紀要*40-2: 21-28, 1991.
- (11) Phillips S. J., E. M. Roberts and T. C. Hung: Quantification of intersegmental reactions during rapid swing motion., *J. Biomechanics* 16-6: 411-417, 1983.
- (12) 齊藤 昌久, 伊藤 章: 2歳時から世界一流短距離選手までの疾走能力の変化, *体育学研究*40: 104-111, 1995.
- (13) 齊藤 満, 星川 保, 宮下 充正, 松井 秀治: 走速度増加に対応する下肢関節の動きについて, *体育学研究*16-5: 265-271, 1971.
- (14) Waser, J.: Zum Techniktraining beim Laufen, *Leistungssport*, 15(1) 34-38, 1985.
- (15) Wilcock A. H. and Kirsner R. L. G.: A digitalfilter for biological data, *Medical and Bio-Engineering and Computing*, 7: 653-660, 1969.